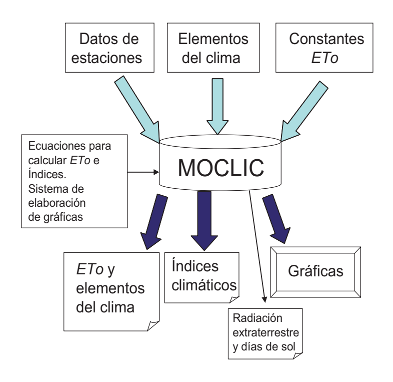
Sistema de análisis de datos para el monitoreo regional y local del cambio climático con índices agroclimáticos (MOCLIC)

Manual de usuario



Francisco Bautista Zúñiga
Dorian Antonio Bautista Hernández
Oscar Álvarez Arriaga
Diego de la Rosa







Bautista F., D.A. Bautista-Hernández, O. Álvarez y D. De la Rosa. 2011. Sistema de análisis de datos para el monitoreo regional y local del cambio climático con índices agroclimáticos (MOCLIC). Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental y Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México.

Patrocinado por:
FOMIX, Fondos mixtos entre el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y el Gobierno del Estado de Yucatán, convocatoria YUC-2006-C05-66159.
El Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, convocatoria APO-SNI-090315

Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México. Carretera a Pátzcuaro 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de La Huerta C.P. 58190 Morelia, Michoacán, México.

Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito de la Investigación Científica, Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510 D.F., México.

ISBN 978-607-02-2368-6

CONTENIDO

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

1. Introducción

El sistema informático MOCLIC permite organizar, almacenar y manipular datos climáticos que se utilizan en el análisis de la evapotranspiración (*ETo*) y de diferentes índices agroclimáticos. La base de datos puede ser enriquecida por diferentes fuentes de información.

Los elementos del clima e índices climáticos almacenados en MOCLIC son aquellos que comúnmente se miden en cualquier estación meteorológica del mundo, esto permite estimar la *ETo* con los métodos empíricos más utilizados: Hargreaves y Tornthwaite.

A diferencia de otros programas que realizan el cálculo de la *ETo* con los métodos de Hargreaves y Tornthwaite, MOCLIC permite cambiar las constantes de estas ecuaciones o métodos con el propósito de utilizar los valores de acuerdo a la calibración con el método de referencia (*ETo*-PM). Esto permite obtener mejores estimaciones de *ETo*.

MOCLIC puede ser de utilidad para:

a) Almacenar, de manera ordenada, datos de clima georreferenciados.

b) Consultas rápidas sobre los elementos del clima almacenados (menús, ventanas e íconos para un fácil uso).

c) Calcular diversos índices bio y agroclimáticos.

d) Definir la duración del período de lluvia en un año o período de años para un lugar determinado.

e) Generar datos para el estudio de la variabilidad de los elementos del clima e índices agroclimáticos a lo largo del tiempo, ya sea en meses o años.

f) Identificar las tendencias de cambio climático a nivel local mediante la aplicación del índice de correlación y la prueba de Mann-Kendall.

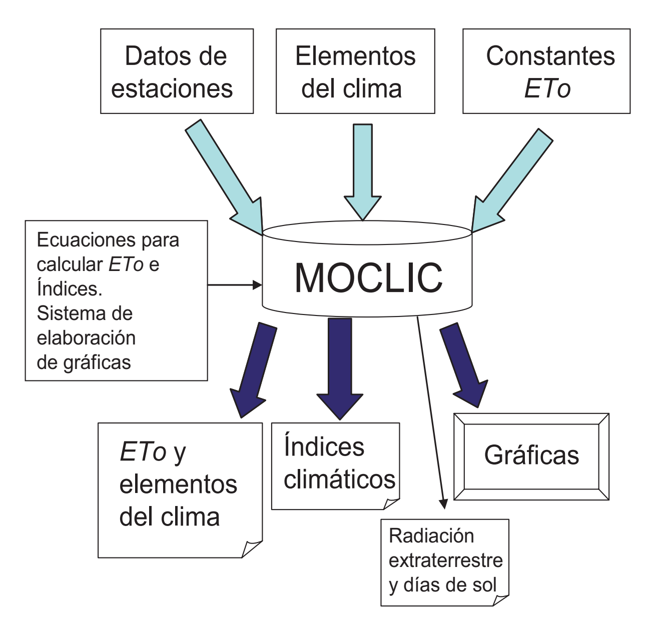


Fig. 1. Variables de entrada y de salida en MOCLIC

2. Variables de entrada o de captura

La observación meteorológica[1] registrada constituye la base principal de la información del sistema. Las variables de entrada se han seleccionado de acuerdo con los valores empleados en el cálculo de *ETo* en los métodos Hargreaves y Thornthwaite.

La estación meteorológica se identifica por la siguiente información:

- Código de la estación o Ref. Se recomienda el uso de tres letras para los estados y dos o tres números para los municipios.
- Latitud: en grados, minutos y segundos.
- Longitud: en grados, minutos y segundos
- Altitud: en metros.

[1]La observación meteorológica o del estado del tiempo se realiza en estaciones especializadas que generan datos para el estudio del clima. A dichas estaciones también se les puede llamar climáticas por los registros históricos; sin embargo, el término meteorológico es más adecuado ya que su propósito es registrar el estado del tiempo, datos con los que después se analiza el clima.

Los datos mensuales almacenados se refieren a las siguientes variables.

- Temperatura máxima, en grados centígrados
- Temperatura media, en ºC
- Temperatura mínima, en ºC
- Precipitación, en milímetros

Es muy importante que los datos de latitud y longitud sean recabados de manera correcta debido a que con base en la localización geográfica, MOCLIC calcula radiación solar extraterrestre (Ra) y horas de sol, ambas necesarias para el cálculo de la *ETo*.

3. Procesamiento de datos

El sistema cuenta con un conjunto de rutinas para el cálculo de variables derivadas que son de uso frecuente en la evaluación de tierras.

3.1 Evapotranspiración potencial por el método de Thornthwaite

Se refiere al cálculo empírico de la evapotranspiración potencial utilizando el modelo Thornthwaite (1948) (*ETo*(T)), a intervalos mensuales, utilizando básicamente la temperatura, aunque incluye también un factor de corrección de la duración del día a partir de la latitud. Según Llorente (1961), el cálculo se lleva a cabo con la siguiente fórmula:

$$ETo = ETo_{sc}\left(\frac{N}{12}\right)\left(\frac{dm}{30}\right)$$

$$ETo_{sc} = C\left(\frac{10 * t_{med}}{I}\right)^{a}$$

$$I = \sum i$$

$$i = C\left(\frac{t_{med}}{5}\right)^{1.524}$$

$$a = 0.49239 + 1792x10^{-5}I - 771x10^{-7}I^{2} + 675x10^{-9}I^{3}$$

$$\mathrm{N} = \frac{24}{\pi}\omega_{s}$$

Donde:

N = número máximo de horas sol, dependiendo del mes y de la latitud
ETo_{sc} = evapotranspiración potencial sin corregir
dm = número de días por mes
C = 16 constante
I = índice calor anual
i = índice calor mensual
a = exponente en función del índice anual
t_{med} = temperatura media por mes

MOCLIC calcula la *ETo*(T) en promedio diario mensual, promedio mensual y promedio anual para el período de años seleccionado.

3.2 Evapotranspiración potencial por el método de Hargreaves (1985)

En este caso, la *ETo*(H) se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$ETo = C_i(t_{med} - 17.78)(t_{max} - t_{min})^{0.5} Ra$$

Donde:
C_i = 0.0023 constante
t_{med} = temperatura media
t_{max} = temperatura máxima
t_{min} = temperatura mínima

$$Ra = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r[\omega_s \sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\sin(\omega_s)]$$

Donde:
Ra = radiación extraterrestre en función de la latitud
π = Pi
G_{sc} = constante solar (0.082 $MJm^{-2}min^{-1}$)
d_r = distancia relativa inversa Tierra-Sol
ω_s = ángulo a la hora de la puesta de sol

φ = latitud en (rad)
δ = declinación solar

MOCLIC calcula la *ETo*(H) en promedio diario mensual, promedio mensual y promedio anual para el período de años seleccionado.

3.3 Índice de humedad (HUi)

Este índice anual se utiliza para estimar, de forma general, el agua disponible para las plantas. También se suele utilizar para prever las necesidades de drenaje artificial en zona urbanas o para clasificar los meses y los años según la humedad del sitio. De esta manera se contabiliza la humedad intra-anual de un sitio, semejante a la longitud del período de crecimiento (FAO 1996) o a la duración del período de lluvias (Delgado-Carranza 2010).

Para el cálculo del índice de humedad (*HUi*) se aplica la siguiente fórmula:

$$HUi = P/ETo$$

Donde:
P = precipitación
ETo = evapotranspiración potencial (por el método de Thornthwaite o de Hargreaves)

El valor de este índice se sitúa de: 0 hasta >1, con seis categorías: hiperáridas (<0.05), áridas (0.06 a –0.2), semiáridas (0.2 a <0.5), subhúmedas secas (0.5 a <0.65), subhúmedas humedas (0.65 a <1), húmedas (1 a 1.5), muy húmedas (1.5 a <2) e hiperhúmedas (<2), respectivamente (Lobo *et al.* 2004).

3.4 Índice de aridez (ARi)

Como un índice anual, este procedimiento simple trata de estimar la aridez general del clima. El *ARi* se calcula en función del número de meses del año en que la evapotranspiración potencial (calculada por el método de Thornthwaite o de Hargreaves) excede a la precipitación.

3.5 Período de desarrollo vegetativo (GS)

Se trata de un procedimiento simple para el cálculo de la duración del período vegetativo (*GS*). Se estiman con base en por el número de meses del año en que la temperatura media sobrepasa los 5 ºC (CEC 1992), situación muy importante en regiones templadas y frías.

3.6 Índice de concentración de las precipitaciones (PCi)

Con el fin de estimar la intensidad de las lluvias, a partir de la variabilidad temporal de las precipitaciones mensuales, Oliver (1980) propuso el índice de concentración de las precipitaciones (*PCi*), expresado en %, mediante la siguiente fórmula:

$$PCi = 100 \text{ x } \Sigma \ (p^2 / P^2)$$

Donde:

p = precipitación mensual

P = precipitación anual

Este índice, cuyo valor oscila entre 8.3 y 100 %, parece ser una expresión estadística adecuada para comparar la concentración de las lluvias entre estaciones. Así, un índice bajo equivale a una distribución uniforme de las lluvias, mientras que un índice alto corresponde a una elevada concentración de las mismas.

3.7 Índice modificado de Fournier (MFi)

El índice modificado de Fournier (*MFi*) se utiliza con frecuencia para estimar la erosividad de las lluvias (factor R) en el proceso de erosión de suelos. Como un índice anual, es definido por Arnoldus (1980) según la siguiente expresión:

$$MFi = \sum \left(\frac{p^2}{P} \right)$$

Donde:

p = precipitación mensual

P = precipitación anual

Los intervalos del *MFi* son: 0-60, 60-90, 90-120,120-160 y mayor que 160, para categorías muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto, respectivamente. (CEC 1992). A pesar de su uso general frecuente, este índice parece ser solamente válido y aplicable dentro de una misma región climática; es decir, regiones climáticas homogéneas deben ser consideradas independientemente.

3.8 Índice de Arkley (AKi)

El índice de Arkley (*AKi*) se utiliza para estimar el efecto del clima sobre el proceso de lavado en los suelos. Arkley (1963) definió dicho índice anual como el valor más elevado, de la suma de las precipitaciones mensuales menos las evapotranspiraciones potenciales (calculada por el método de Thornthwaite o de Hargreaves) de aquellos meses en que la precipitación es mayor que la evapotranspiración, o bien de la cantidad total de precipitación del mes más húmedo

4. Instalación de MOCLIC

El sistema MOCLIC se distribuye en un CD que contiene el programa instalador.

En el CD de distribución se encuentra el archivo Setup, encargado de instalar la aplicación y los archivos necesarios para su funcionamiento en el ordenador. Para ello introduzca el CD y ejecute Setup. Siga las indicaciones de la pantalla.

A continuación el sistema y la base de datos quedarán en el directorio:

C:\Archivos de Programa\MOCLIC

Se puede cambiar el directorio, pero se recomienda dejar el predeterminado.

Una vez terminada la instalación, en el escritorio de la pantalla se encontrará el ícono de acceso directo a MOCLIC.

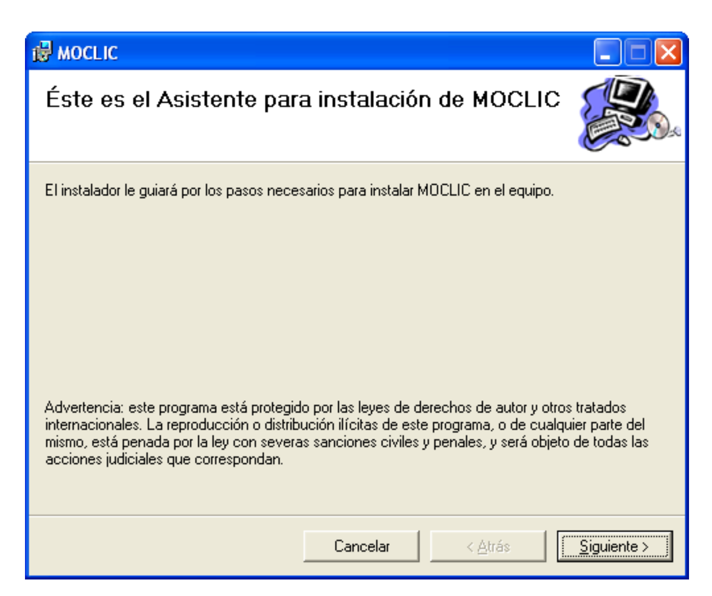


Fig. 2. Pantalla de instalación.

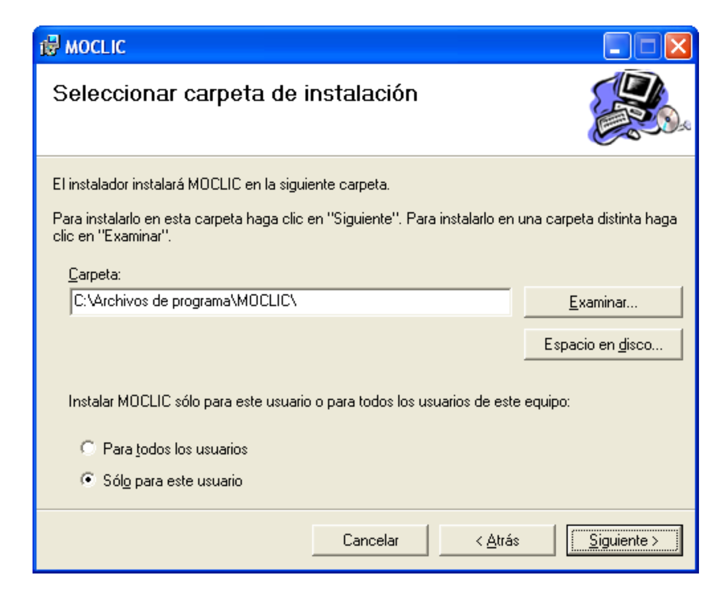


Fig. 3. Directorio predeterminado de instalación.

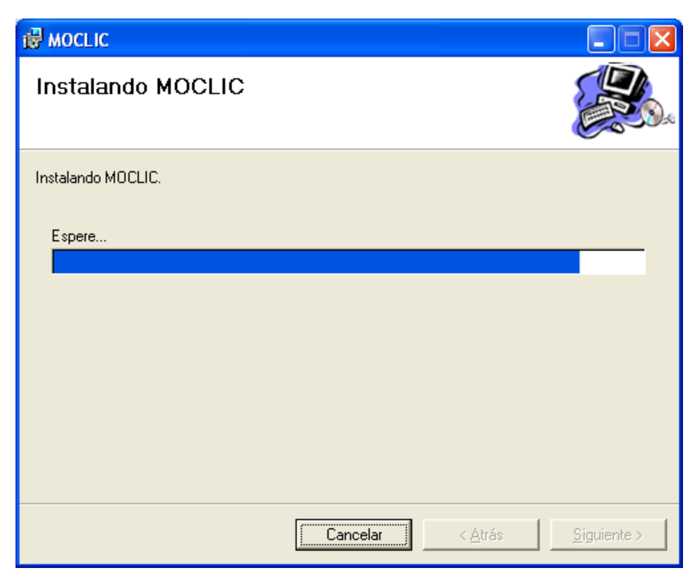


Fig. 4. Instalación en proceso.

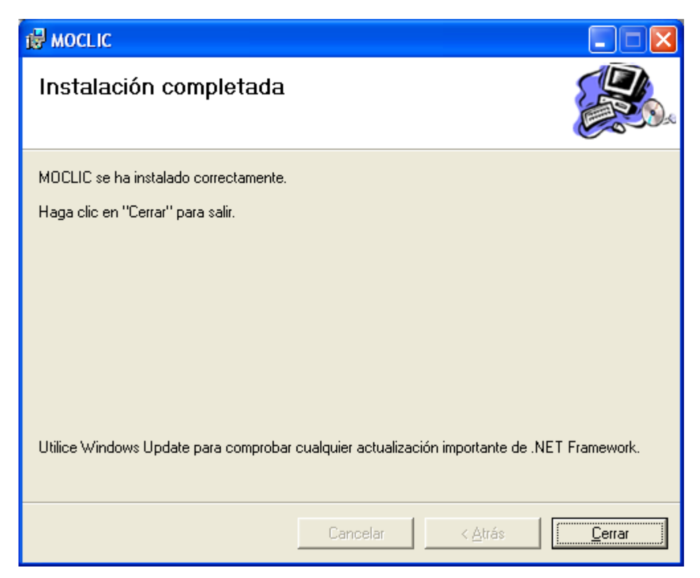


Fig. 5. Instalación terminada.

5. Funcionamiento del sistema MOCLIC

El sistema MOCLIC se presenta en varios idiomas. El idioma se seleccionará al empezar la aplicación, dando clic en la lista desplegable (Fig. 6a). Una vez seleccionado el idioma visualiza la pantalla inicial de MOCLIC en el lenguaje seleccionado.

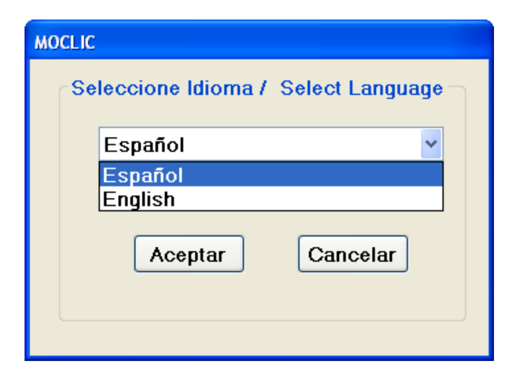


Fig. 6a. Selección idioma para trabajar MOCLIC.

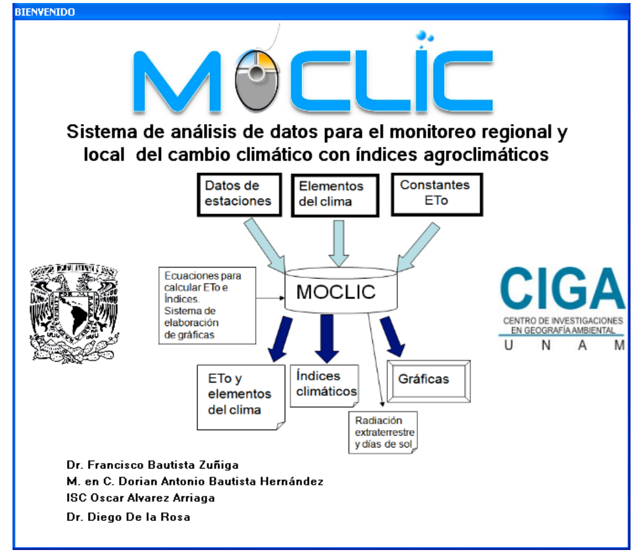


Fig. 6b. Pantalla inicial MOCLIC.

El sistema de MOCLIC es sencillo de utilizar ya que ofrece un entorno gráfico constituido por un conjunto de ventanas e íconos claramente identificables (Fig. 7).

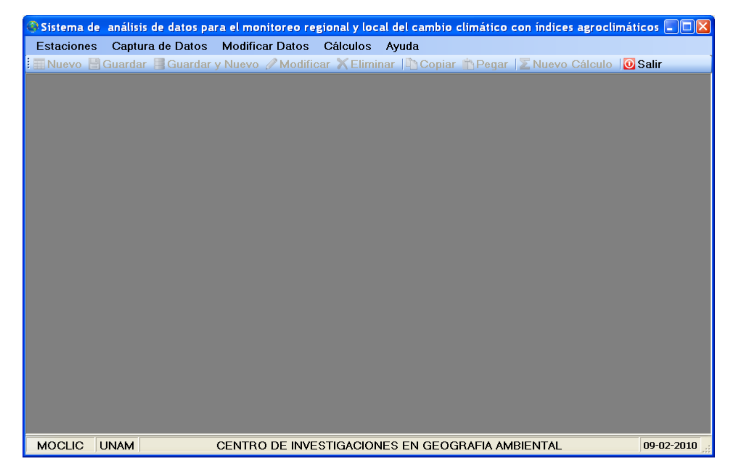


Fig. 7. Pantalla principal.

Cuenta con varios menús e íconos. En la pantalla principal se pueden observar las barras de herramientas:

- Estaciones
- Captura de datos
- Modificar datos
- Cálculos
- Ayuda

Los íconos del sistema que se muestran son:

- Nuevo
- Guardar
- Guardar y Nuevo
- Pegar
- Nuevo Cálculo
- Salir

Estos íconos inicialmente están desactivados; se activarán al momento de entrar a una ventana de las opciones de menús, en correspondencia con a la ventana que se encuentre abierta.

5.1 Menú de estaciones

En este menú se muestran en forma tabular todas las estaciones climáticas registradas por la base de datos del sistema MOCLIC (Fig. 8). La información mostrada de cada estación es: Código o Ref, Nombre, Latitud, Longitud, Altitud y Estado.

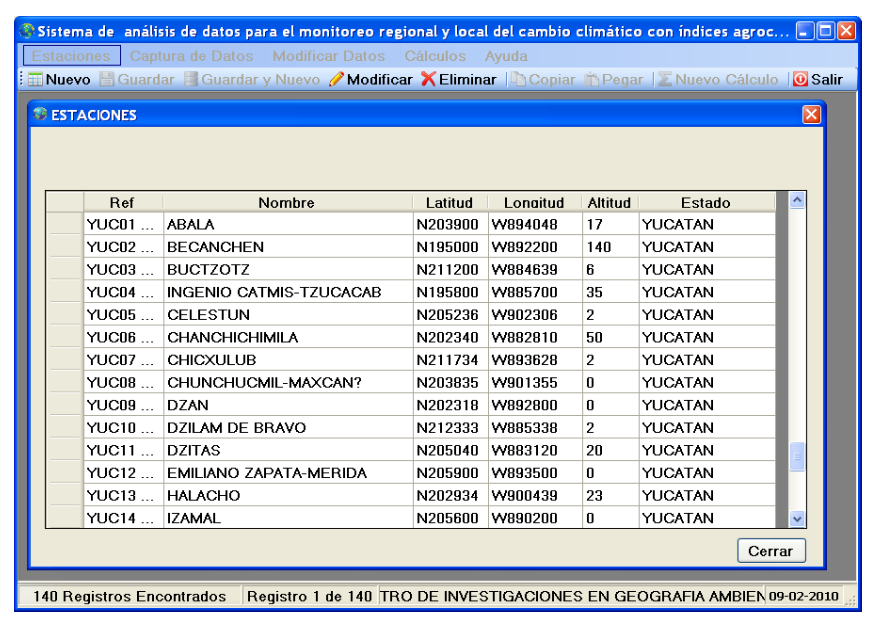


Fig. 8. Estaciones.

Ícono nuevo

Cuando se abre la ventana Estaciones se activa el ícono Nuevo, este ícono abre una nueva ventana en la que se podrán capturar nuevas estaciones climáticas con todos sus datos individuales.

Ventana de alta estación

En la ventana alta estación se introducen los datos individuales para cada estación (Fig. 9).

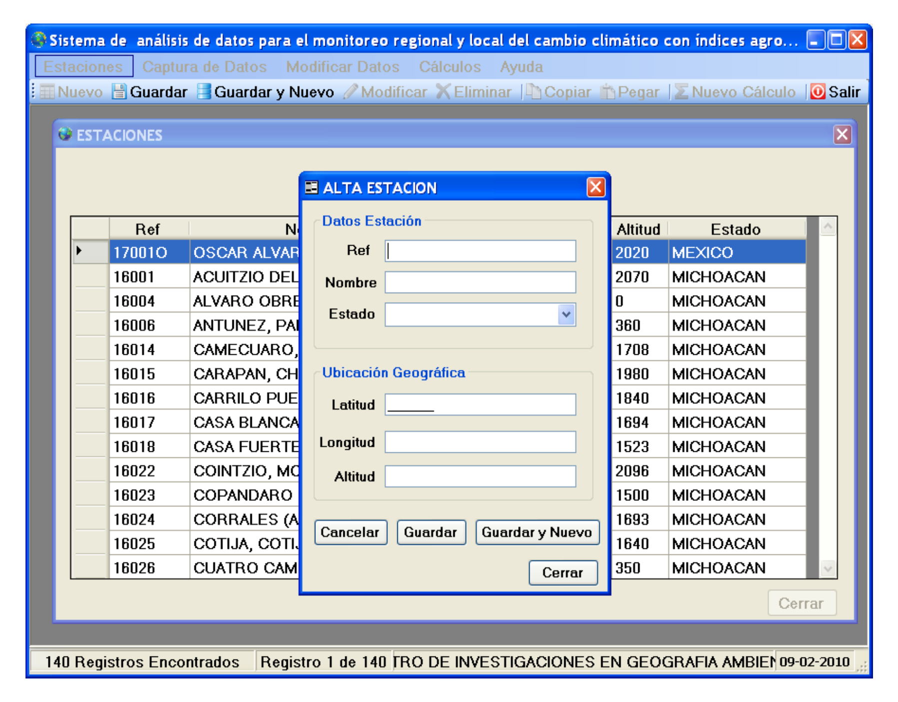


Fig. 9. Alta estación.

Los campos a introducir son:

Ref: código o referencia de la estación climática. Limitado a 10 caracteres.

Nombre: nombre de la estación climática. Limitado a 100 caracteres.

Estado: estado de la República mexicana donde se encuentra la estación. Debe seleccionarse un estado de la lista.

Latitud: latitud de la estación climática. Campo con formato de entrada de datos, 1 letra y 6 dígitos: LDDDDDD.

Longitud: longitud de la estación climática. Campo con formato de entrada. 1 letra y 6 ó 7 dígitos. LDDDDDD ó LDDDDDD.

Altitud: altitud de la estación climática. Limitado a 4 dígitos.

Botón cancelar: Al oprimirlo, se cancela la orden de nueva estación. Automáticamente se cierra la ventana.

Botón guardar: Guarda la información capturadas en la base de datos. Se cierra automáticamente la ventana. Desde aquí se visualizan todas las estaciones con la nueva estación capturada. También se pueden guardar los datos con el ícono guardar de la barra de herramientas.

Botón guardar y nuevo: Guarda los datos capturados; limpia todos los campos escritos y se posiciona en el campo Ref para capturar una nueva estación. También pueden guardarse los datos con el ícono guardar y nuevo de la barra de herramientas.

Botón cerrar: cierra la ventana. Con su función se visualizan todas las estaciones.

5.2 Menú de captura de datos

En el menú "Captura de datos" se introducirán las temperaturas observadas y precipitación de un conjunto de años o de un año en particular para alguna estación climática (Figs. 10a y 10b).

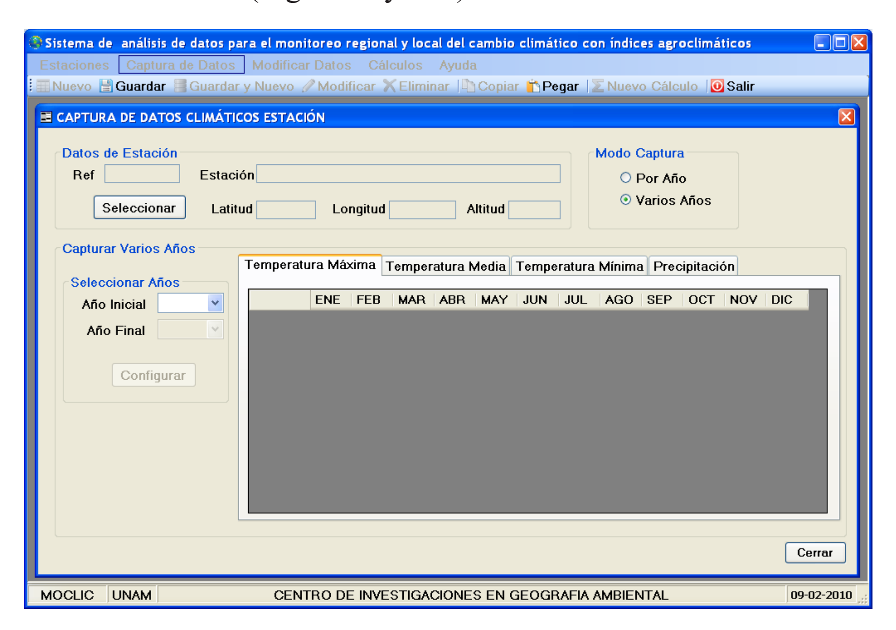


Fig. 10a. Captura de datos por conjunto de años.

Recuadro Datos de estación

Al dar clic al botón "seleccionar", se mostrarán los datos de la estación climática; se abrirá la ventana de Estaciones para selección (Fig. 11).

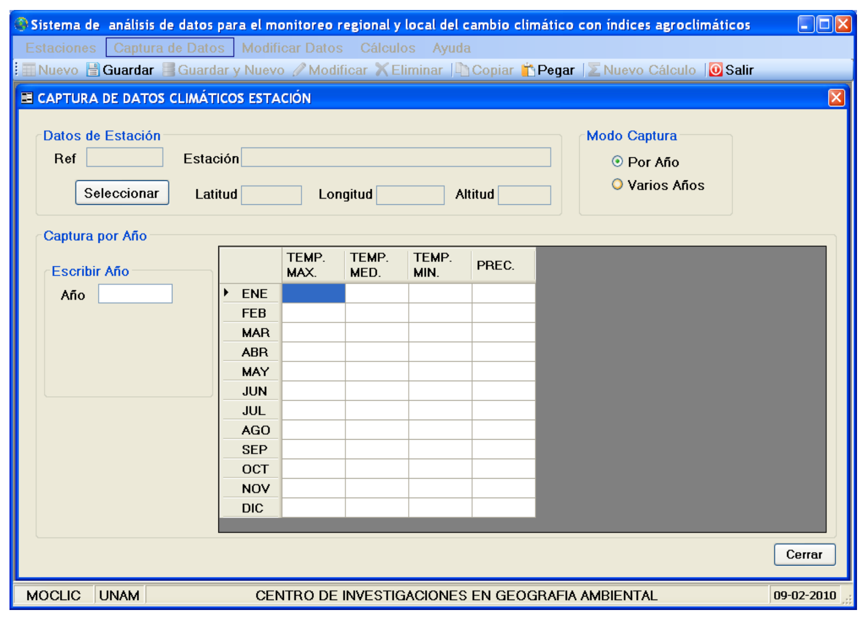


Fig. 10b. Captura de datos por año.



Fig. 11. Seleccionar de estación.

Selección de estación

En esta ventana se puede recorrer la lista completa de estaciones ubicada en la base de datos del sistema para su selección. La forma de seleccionar la estación es dar doble clic en la estación elejida. Los datos serán cargados y mostrados en el recuadro "Datos de estación" de la ventana captura de datos.

Botón buscar

Puede buscarse una estación con más rapides usando el campo de texto.

Búsqueda por referencia o nombre estación. La búsqueda se hace en la tabla de mediante cualquier coincidencia del texto en la columna Ref o Nombre de una estación; esta función muestra todas las coincidencias (Fig. 12). La selección se hace con doble clic sobre la estación. Los datos serán cargados y mostrados en el recuadro "datos de estación" de la ventana "captura de datos".

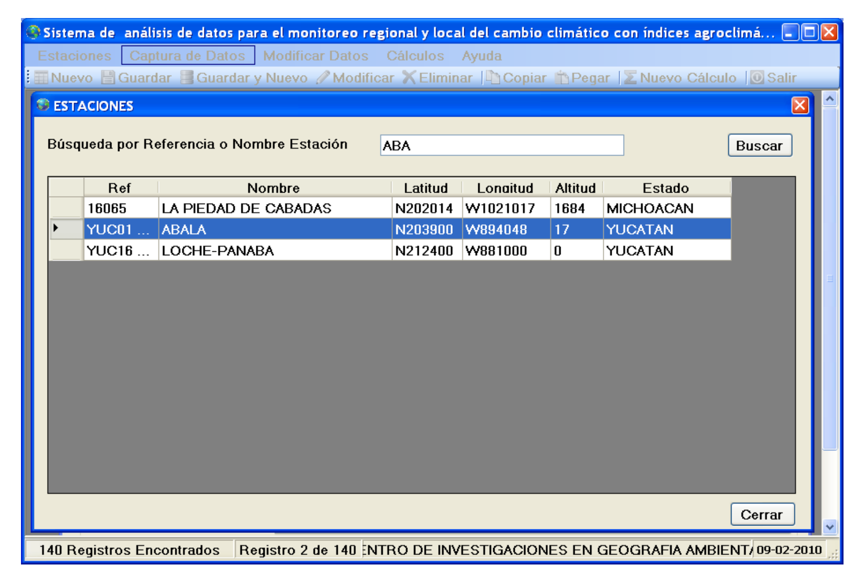


Fig. 12. Búsqueda por referencia o nombre.

Recuadro modo de captura

Este recuadro despliega las opciones:

Por Año: Pueden introducirse valores de temperaturas observadas por año. Se teclea un año de captura en el campo año del recuadro "Escribir año". En la tabla se insertan los datos de las temperatura máxima, media, mínima y precipitación de cada mes (Fig. 13).

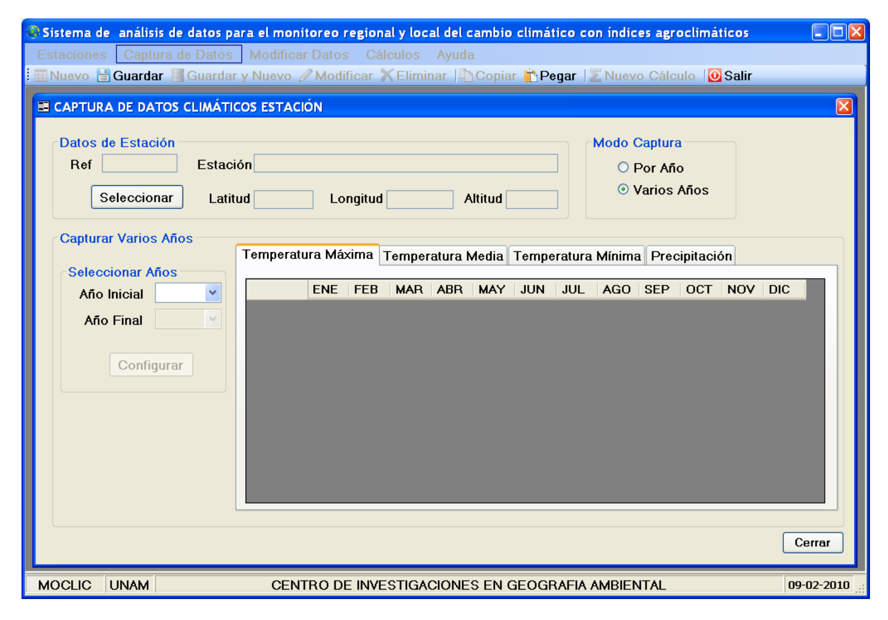


Fig. 13. Captura por año.

Por varios años: Pueden introducirse los valores de las temperaturas observadas por un período de años. Se configuran los años a capturar en el recuadro "seleccionar años". Primero se selecciona el año inicial del período y después el año final del período. Para que las tablas de las temperaturas se configuren de acuerdo al período seleccionado de años se clic en el botón configurar (Figs. 14, 15a y 15b).

Opción pegar: Con el ícono "pegar" de la barra de herramientas puede agregarse conjuntos de datos desde una hoja de Excel en cualquiera de las modalidades de captura. Por año o por varios años. Primero debe seleccionarse el conjunto de datos en la hoja Excel. Después se selecciona la primera celda de la tabla y, posteriormente, se hace clic en el ícono "pegar" (Figuras 16 y 17).

Precaución: Debe tenerse cuidado al seleccionar el conjunto de datos.

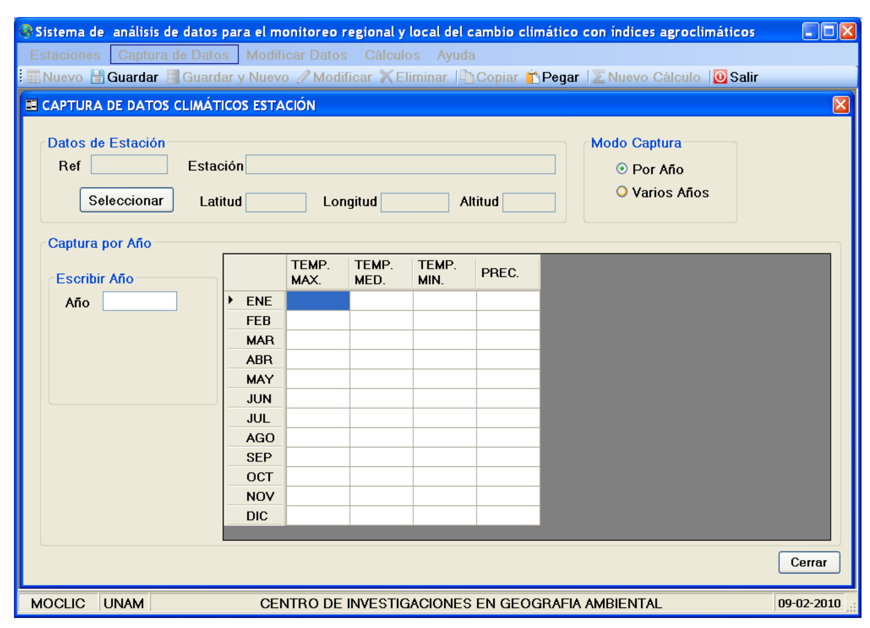


Fig. 14. Captura varios años.

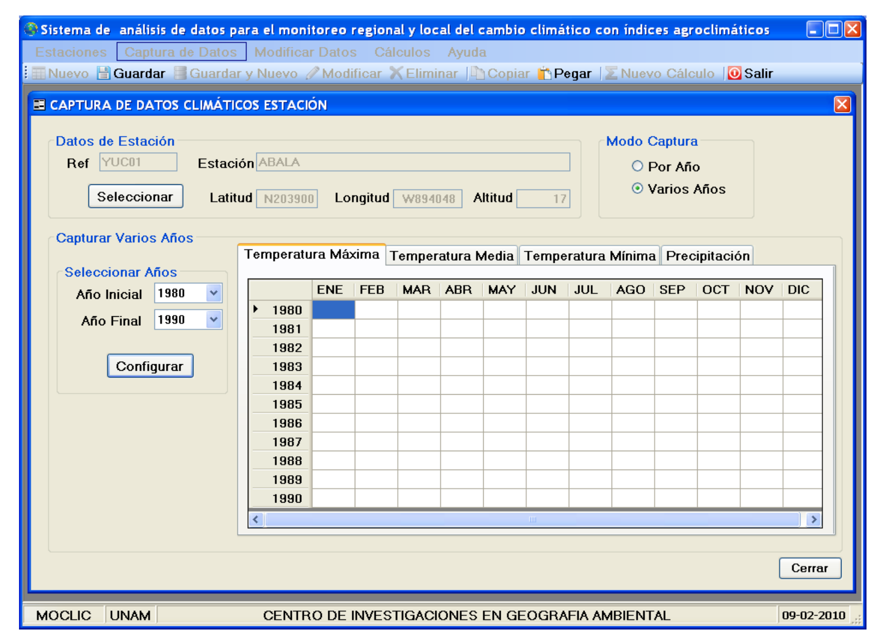


Fig. 15a. Configurar años.

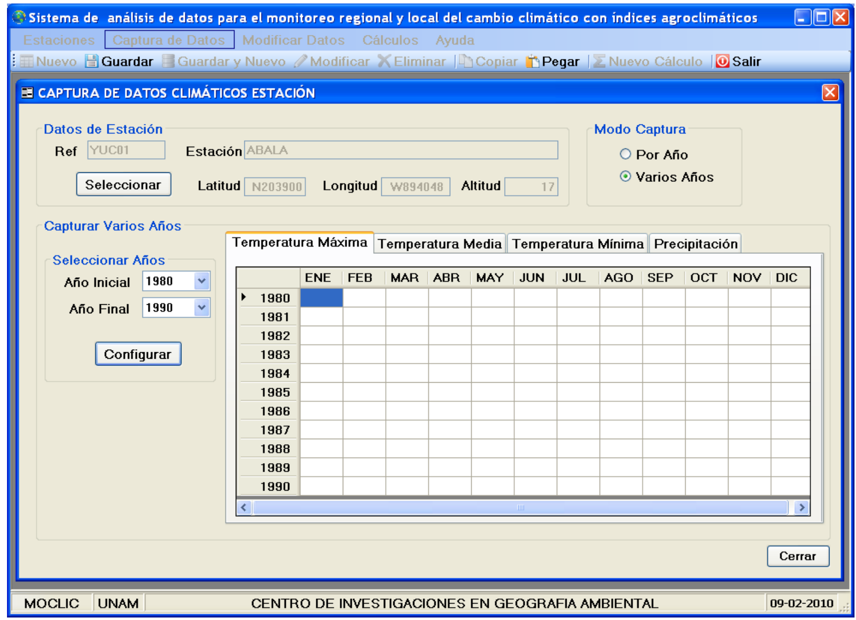


Fig. 15b. Configurar años.

ABALA2(1) [Modo de compatibilidad] - Microsoft Excel

Inicio | Insertar | Diseño de página | Fórmulas | Datos | Revisar | Vista

B24 | 35

ESTACIÓN ABALÁ — MUNICIPIO ABALÁ — ESTADO YUCATÁN — ARCHIVO DLY31001

TEMPERATURA MÁXIMA EXTREMA EN ºC

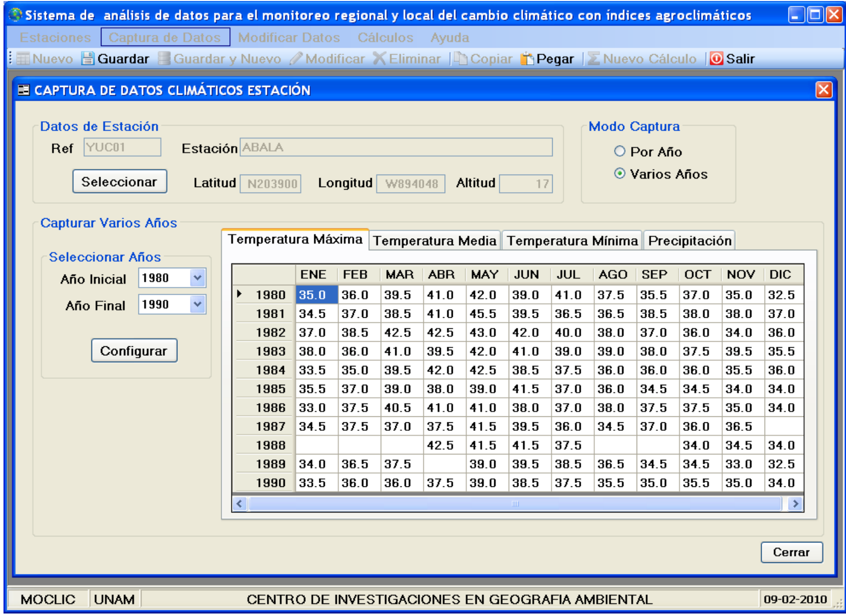
LATITUD 20° 39' 03'' N — LONGITUD 89° 40' 49'' W — ALTITUD 17 MTS. — CLAVE 00031001

AÑO	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
1974	33.5	37.0	39.5	40.5	42.0	39.5	35.5	36.5	36.0	34.5	35.0	35.0
1975	36.0	37.5	43.0	46.5	43.0	44.5	41.0	36.0	35.0	34.0	38.0	32.5
1976	38.0	35.5	38.0	41.5	39.5	38.5	35.5	38.5	35.5	36.0	37.0	39.5
1977	34.5	36.5	39.5	39.0	38.0	37.0	36.0	36.0	36.5	36.0	35.5	34.5
1978	35.5	37.5	38.5	38.0	42.0	35.5	35.5	36.5	37.5	35.0	36.5	36.5
1979	34.5	37.0	39.0	40.5	39.0	41.5	38.0	37.0	36.0	37.5		34.0
1980	35.0	36.0	39.5	41.0	42.0	39.0	41.0	37.5	35.5	37.0	35.0	32.5
1981	34.5	37.0	38.5	41.0	45.5	39.5	36.5	36.5	38.5	38.0	38.0	37.0
1982	37.0	38.5	42.5	42.5	43.0	42.0	40.0	38.0	37.0	36.0	34.0	36.0
1983	38.0	36.0	41.0	39.5	42.0	41.0	39.0	39.0	38.0	37.5	39.5	35.5
1984	33.5	35.0	39.5	42.0	42.5	38.5	37.5	36.0	36.0	36.0	35.5	36.0
1985	35.5	37.0	39.0	38.0	39.0	41.5	37.0	36.0	34.5	34.5	34.0	34.0
1986	33.0	37.5	40.5	41.0	41.0	38.0	37.0	38.0	37.5	37.5	35.0	34.0
1987	34.5	37.5	37.0	37.5	41.5	39.5	36.0	34.5	37.0	36.0	36.5	
1988				42.5	41.5	41.5	37.5			34.0	34.5	34.0
1989	34.0	36.5	37.5		39.0	39.5	38.5	36.5	34.5	34.5	33.0	32.5
1990	33.5	36.0	36.0	37.5	39.0	38.5	37.5	35.5	35.0	35.5	35.0	34.0
1991	33.5	34.5	42.5	42.0	40.5	37.0	36.5	36.5	34.5	34.5	32.5	32.0
1992	31.5	35.5	38.0	38.5	38.0	40.0	38.5	39.0	39.0	36.5	36.5	33.5
1993	33.5	37.5	39.0	40.0	41.5	38.0	37.5	37.5	36.5	34.5	35.0	35.5

ABALÁ | Hoja1

Seleccione e... Promedio: 37.5 Recuento: 125 Suma: 4684.0 110%

Fig. 16. Seleccionar datos de hoja Excel.



	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1980	35.0	36.0	39.5	41.0	42.0	39.0	41.0	37.5	35.5	37.0	35.0	32.5
1981	34.5	37.0	38.5	41.0	45.5	39.5	36.5	36.5	38.5	38.0	38.0	37.0
1982	37.0	38.5	42.5	42.5	43.0	42.0	40.0	38.0	37.0	36.0	34.0	36.0
1983	38.0	36.0	41.0	39.5	42.0	41.0	39.0	39.0	38.0	37.5	39.5	35.5
1984	33.5	35.0	39.5	42.0	42.5	38.5	37.5	36.0	36.0	36.0	35.5	36.0
1985	35.5	37.0	39.0	38.0	39.0	41.5	37.0	36.0	34.5	34.5	34.0	34.0
1986	33.0	37.5	40.5	41.0	41.0	38.0	37.0	38.0	37.5	37.5	35.0	34.0
1987	34.5	37.5	37.0	37.5	41.5	39.5	36.0	34.5	37.0	36.0	36.5	
1988				42.5	41.5	41.5	37.5			34.0	34.5	34.0
1989	34.0	36.5	37.5		39.0	39.5	38.5	36.5	34.5	34.5	33.0	32.5
1990	33.5	36.0	36.0	37.5	39.0	38.5	37.5	35.5	35.0	35.5	35.0	34.0

Fig. 17. Pegar datos.

Guardar datos

Una vez que se han capturado los datos, se hace clic en el ícono “Guardar” para actualizar la base con los datos del conjunto de años o del año. Si algún dato no ha sido capturado, el sistema automáticamente inserta el valor 999.99 que se refiere a los datos que no fueron incluidos y, por lo tanto, no se tomarán en cuenta en los cálculos de la *ETo* ni de los índices. También existe la opción para que en datos faltantes se establezca automáticamente el promedio de los valores introducidos para el mes del que se tienen datos. Así, no se cargaría automáticamente el valor 999.99, y el dato entraría en el cálculo de la *ETo*.

El sistema indicará cuando reconozca un valor en blanco y dará las opciones para continuar con valores 999.99 o introducir el promedio del mes.

5.3 Menú para modificar datos

En el menú “Modificar datos” se pueden rectificar los registros de alguna estación. Esta acción tiene como fin actualizar la base de datos correctamente ya que en algunos casos no se cuenta con valores observados. La ventana “Modificar datos” muestra la lista de estaciones incluidas en el sistema y el período de años que contienen datos. La estaciones sin datos capturados no aparecerán

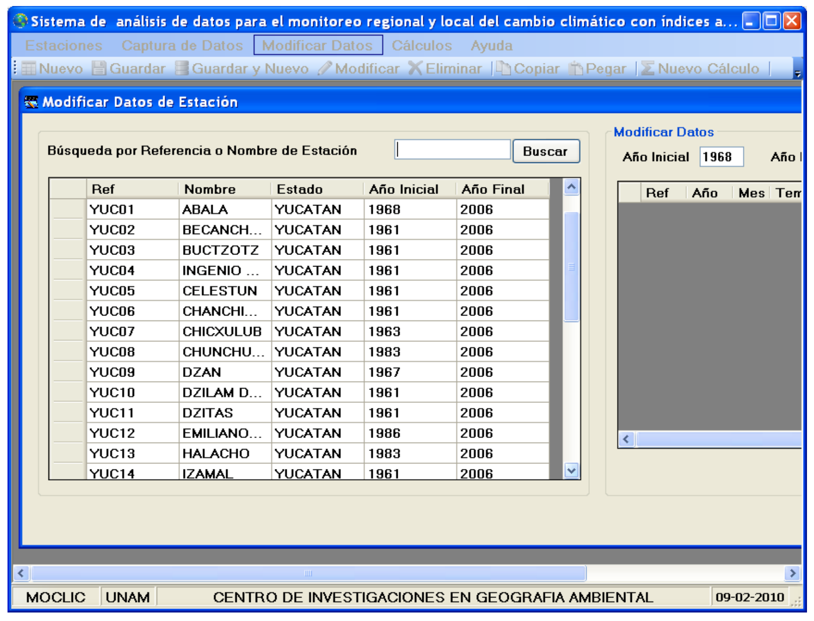


Fig. 18a. Modificar datos estación.

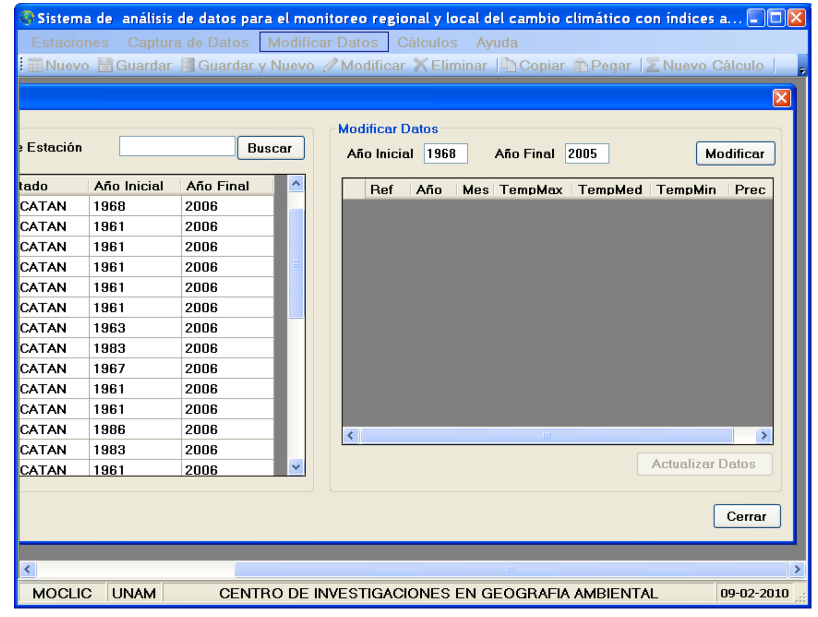


Fig. 18b. Modificar datos estación.

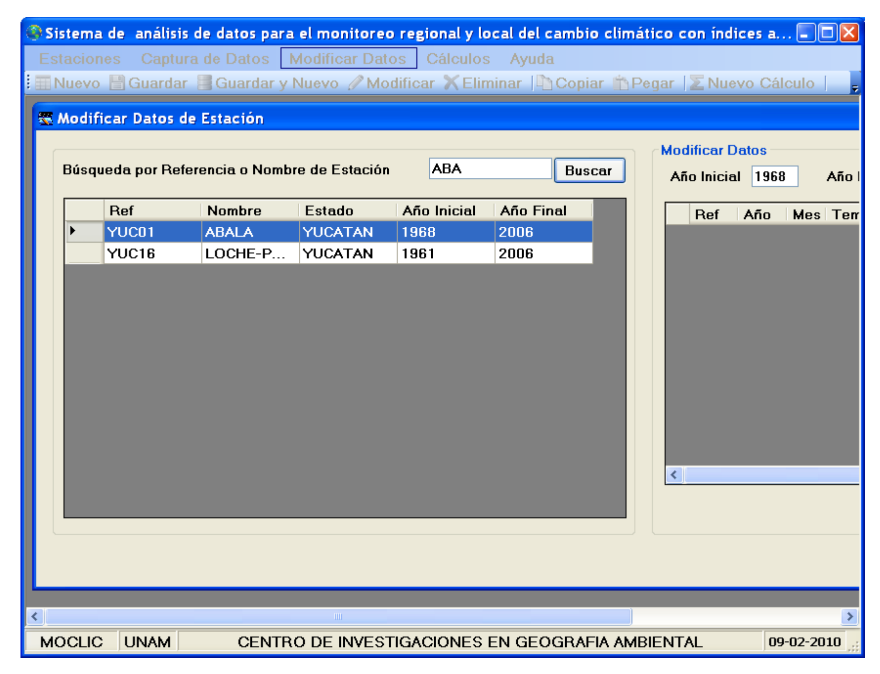


Fig. 19. Búsqueda de estación.

en esta ventana, pero aparecerán en la ventana de “Estaciones” del menú estaciones (Figs. 18a y 18b). Puede buscarse una estación por medio del campo de búsqueda por referencia o nombre de estación, en donde se introduce un texto o frase coincidente con alguna estación por su referencia o nombre (Fig. 19).

Botón buscar

Esta función tiene por objeto buscar en la tabla las coincidencias del campo de texto y muestra los resultados actualizando la cuadrícula.

Al hacer clic sobre una estación, se selecciona y se tendrá la posibilidad de modificar un año. En el campo “introducir año” se teclea el año a modificar y posteriormente se hace clic en el botón modificar. De ese modo, se cargan los datos del año introducido y se procede a modificar los datos (Fig. 20).

Botón actualizar datos

Una vez que se han modificado los datos, se actualizan haciendo clic en el botón actualizar datos.

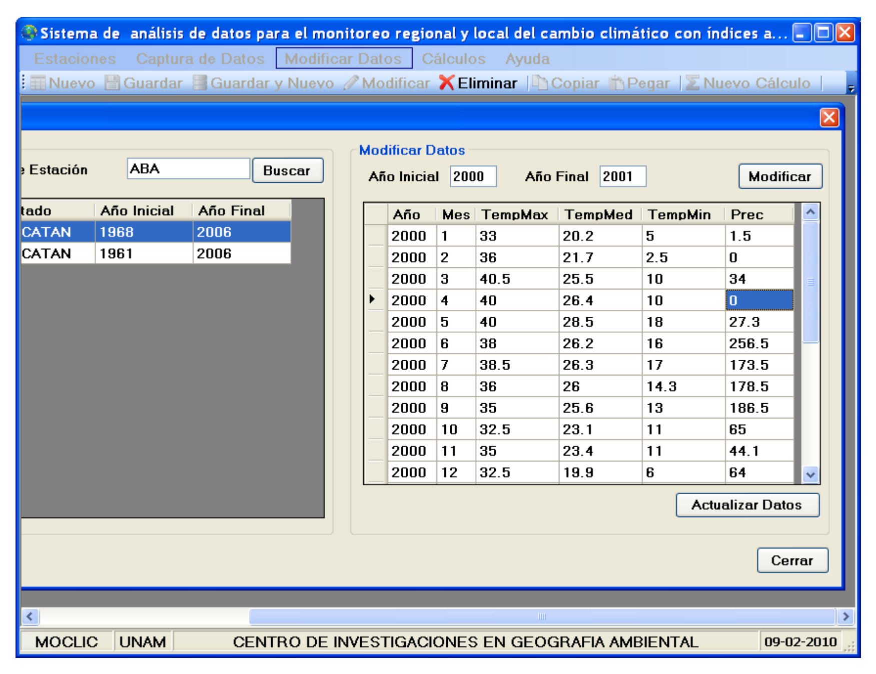


Fig. 20. Actualizar datos.

Botón cerrar

Este botón cierra la ventana “modificar datos” y regresa a la pantalla principal.

5.4 Menú de cálculos

El menú “cálculos” es la base del sistema, ya que se encarga de hacer los cálculos necesarios para obtener la *ETo* en un período de años de alguna estación climática. Esta ventana consta de varias pestañas con las que el usuario puede interactuar de forma alternada. Éstas son:

- Estación
- Datos
- Índices
- Gráficas
- Pestaña estaciones

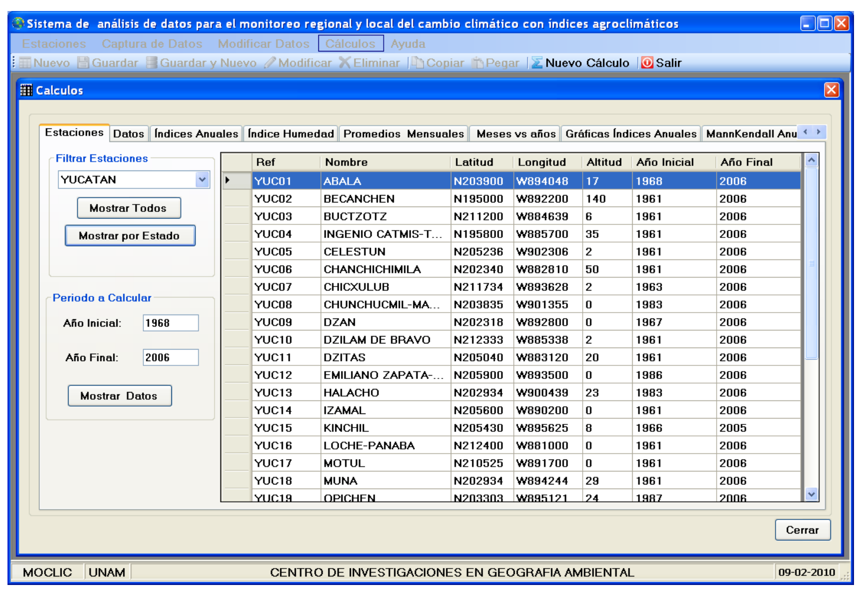


Fig. 21. Filtrar estaciones.

Existen dos recuadros y una cuadrícula. La cuadrícula muestra el total de las estaciones agregadas en la base de datos del sistema.

En el recuadro “Filtrar estaciones” pueden seleccionarse las estaciones de algún estado o entidad federativa en particular por medio de la lista desplegable y el botón “Mostrar por estado” (Fig. 21).

Botón “Mostrar todos”

Presenta en la cuadrícula el total de las estaciones existentes.

Botón “Mostrar por estado”

Muestra las estaciones pertenecientes al estado seleccionado en la lista desplegable.

Período a calcular

En el recuadro “Período a calcular” se introduce en los campos el año inicial y el año final que se desea o pretende analizar de la estación seleccionada, de acuerdo con las columnas año inicial y año final mostrado en la cuadrícula de información de cada estación.

Cuadrícula

Una vez configurado el período de años que se desean analizar, se hace doble clic sobre la estación para cargar los datos observados de temperaturas y precipitación. Al hacer doble clic se cambia a la pestaña "datos" donde se podrán visualizar las cifras guardadas en la base del sistema.

Mostrar datos

En el botón "Mostrar datos" se introducen los datos de temperatura y precipitación en una cuadrícula en la pestaña datos, dichos datos corresponden al período en años introducidos en los campos de texto año inicial y año final; automáticamente se cambia a la pestaña "datos" y aparecen los datos. Tiene la misma función hacer doble clic sobre la estación seleccionada.

Pestaña de datos

En la pestaña "Datos" se muestra un campo de estación, un recuadro de constantes y una cuadrícula.

Campo Estaciones

Se muestra el nombre de la estación a analizar.

Cuadrícula

En la cuadrícula se muestran los datos observados de la estación y datos adicionales para el cálculo de *ETo*, estos valores son (Figs. 22a y 22b): año, número del mes, temperatura máxima, temperatura media, temperatura mínima, precipitación, radiación solar (ver fórmula para *Ra* en variables de salida), horas de sol (ver fórmula para *N* en conceptos), ETo por Hargreaves y Thornthwaite en mm/día y mm/mes. Estos valores deben ser calculados.

Recuadro constantes

En el recuadro "Constantes" se muestran los valores predeterminados de las constantes de las ecuaciones de Hargreaves y Thornthwaite para realizar el cálculo de la *Eto*. Estos valores son mensuales y se pueden modificar en cada campo según las necesidades del usuario, previa calibración como se muestra en el apéndice I de Bautista *et al.* (2009).

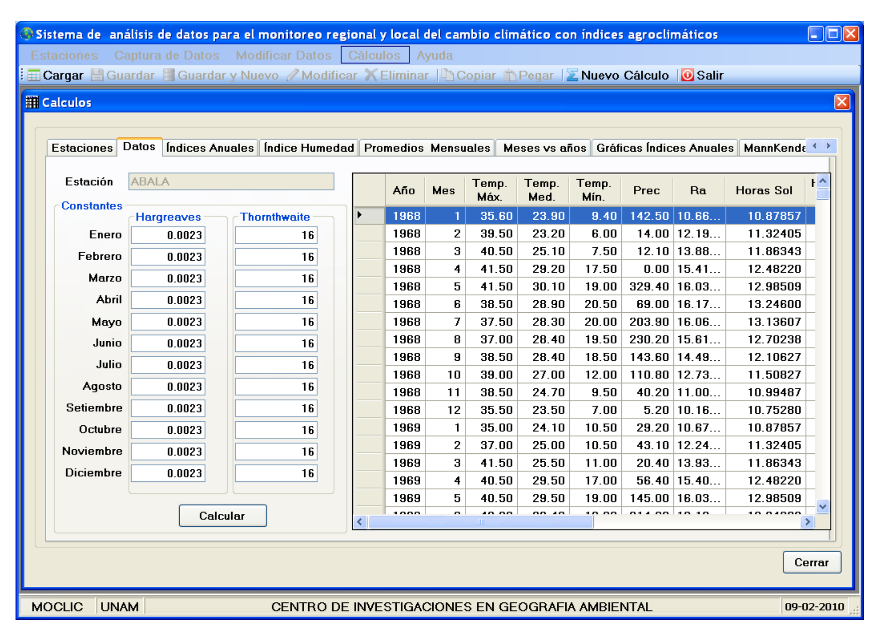


Fig. 22a. Datos y constantes.

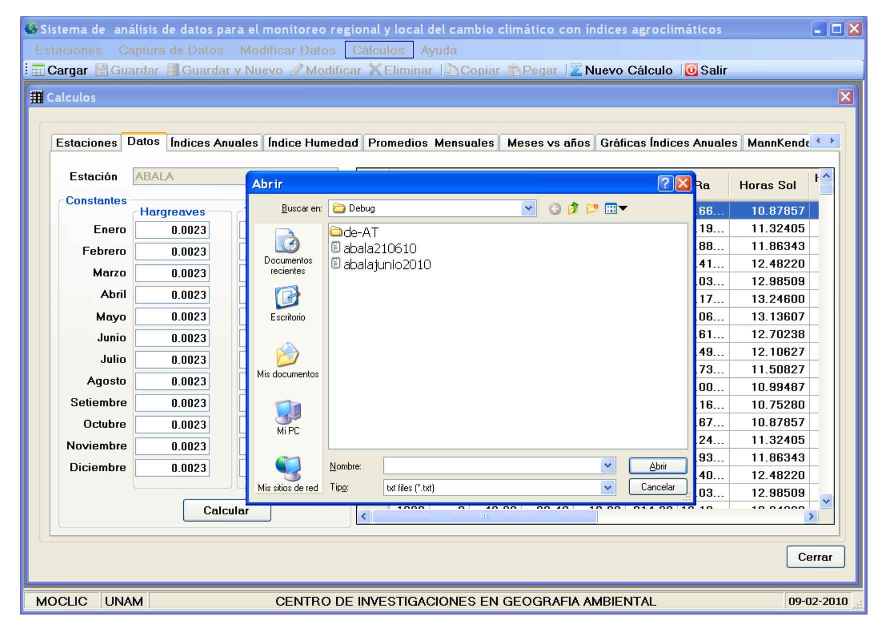


Fig. 22b. Cargar constantes.

Cargar

Con este ícono se pueden agregar datos de las nuevas constantes para el calculo de la *ETo* que previamente se hayan guardado. Al hacer clic en el ícono se despliega el cuadro de dialogo "Abrir archivos" y se selecciona el archivo de texto que contengan las constantes guardadas para el cálculo de la *Eto*. Estos valores de constantes se actualizan en el recuadro "Constantes" en las cajas de texto de cada mes (Fig. 22b).

Botón Calcular

Inicia el cálculo de *Eto* de acuerdo con las constantes y con los valores de la estación mostradas en la cuadrícula. Se actualiza la cuadrícula con los valores calculados para *Eto* con Hargreaves y Thornthwaite en mm/día y mm/mes. Fig. 23.

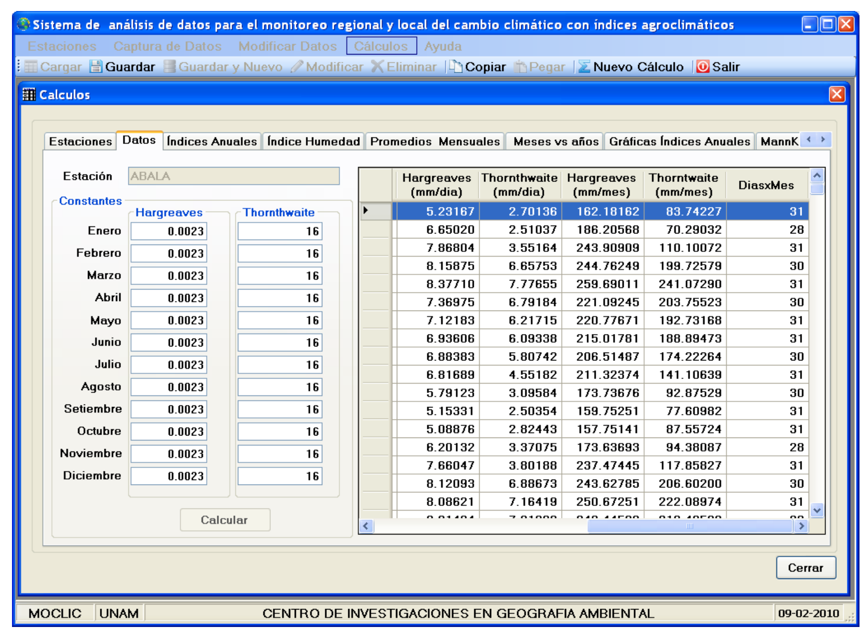


Fig. 23. *ETo* calculada.

Guardar

Con la función este ícono se pueden guardar las constantes de la *ETo* de las ecuaciones de Hargreaves y Thornthwaite. Las constantes se guardan en un

archivo de texto (.txt) que pueden ser útiles para un cálculo posterior; es decir, quedan predefinidas.

Pestaña Índices anuales

La pestaña “Índices anuales” despliega los índices agroclimáticos del período de años deseados. Dichos índices se muestran en una cuadrícula y pueden seleccionarse mediante los métodos Hargreaves y Thornwaite en el recuadro “Ver índice por”.

Cuadrícula

Muestra los índices agroclimáticos del conjunto de años observados. Éstos son:

- Hui: Índice de humedad.
- Ari: Índice de aridez
- GS: Período de desarrollo vegetativo
- PCi: Índice de concentración de las precipitaciones
- MFi: Índice modificado de Fournier
- AKi: Índice de Arkley

Recuadro “Ver índice por”

En el recuadro “Ver índice por” puede seleccionarse el método Hargreaves o el Thorntwaite para visualizar los índices agroclimáticos. La cuadrícula se actualiza de acuerdo con el método (Fig. 24).

Pestaña “Índice humedad”

En la pestaña “Índice humedad” aparecen las gráficas de la media del “Índice Hui” mensual en el período calculado. Las gráficas del índice Hui se pueden visualizar por Hargreaves o Thornthwaite o ambos al mismo tiempo (Fig. 25).

Pestaña Promedios mensuales

La pestaña “Promedios mensuales” presenta las gráficas de medias de los datos analizados en el período de años; tales medias son (Fig. 26):

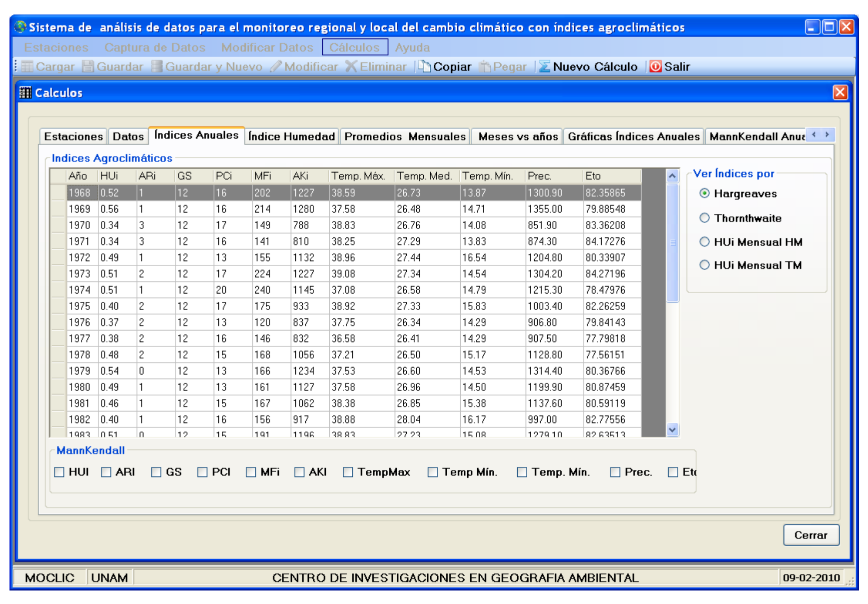


Fig. 24. Índices agroclimáticos.

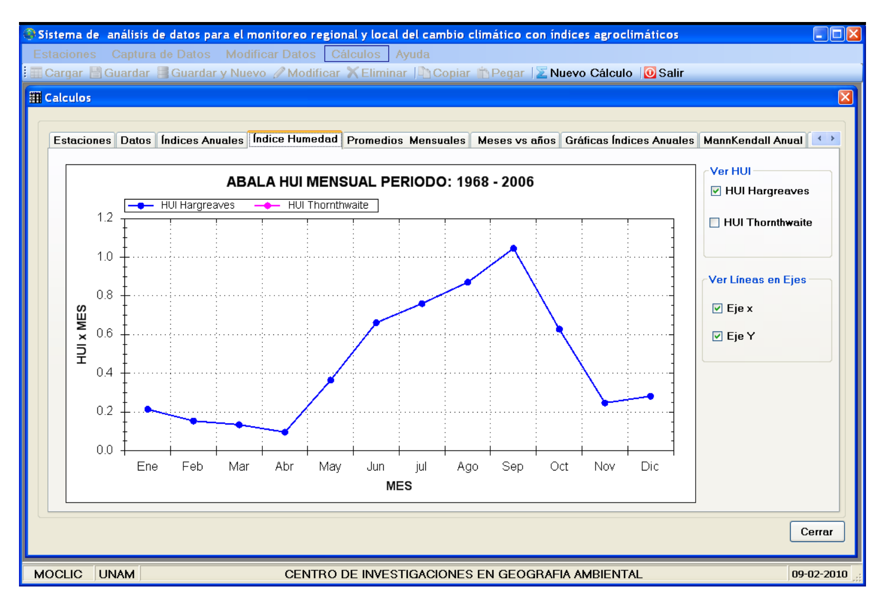


Fig. 25. Gráfica media Índice Hui.

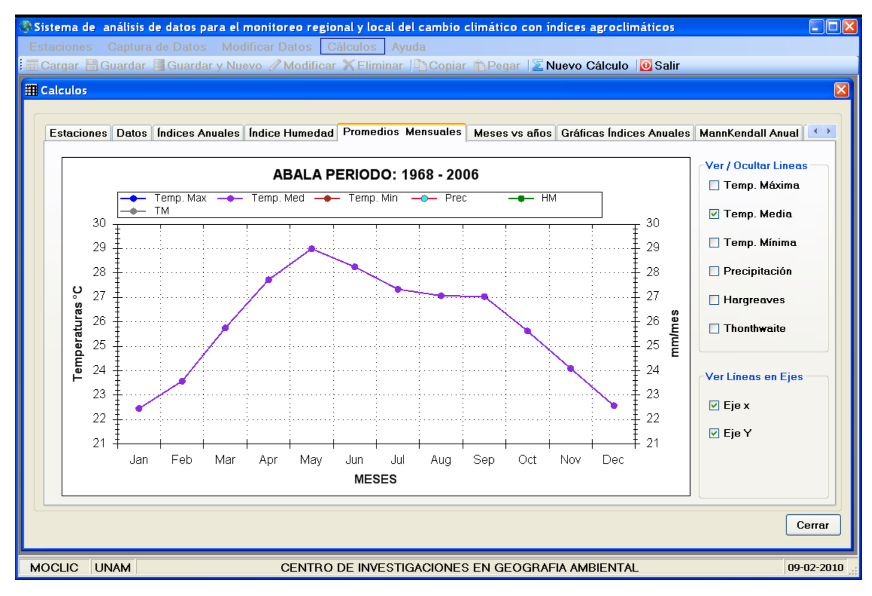


Fig. 26. Gráficas medias por mes.

- Temperatura máxima
- Temperatura media
- Temperatura mínima
- Precipitación
- *Eto* Hargreaves en mm/día
- *Eto* Thornthwaite en mm/día

Las gráficas pueden examinarse una por una o en conjunto, activando la casilla de la gráfica que se desee.

Pestaña Meses vs años

Esta pestaña muestra los datos de cada mes por cada año del período seleccionado. Los datos corresponden a la temperaturas máximas, media, mínima, así como a la precipitación y a la *Eto* calcula con Hargreaves y Thornthwaite. Primero de selecciona en la gráfica el dato a mostrar y después el mes, en los recuadros correspondientes (Fig. 27).

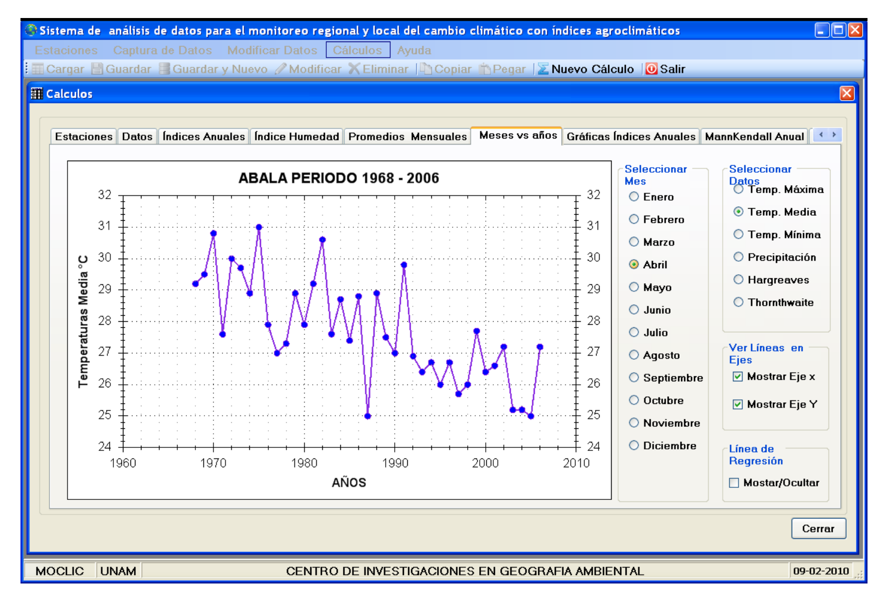


Fig. 27. Datos mensuales por periodo.

Pestaña Datos anuales

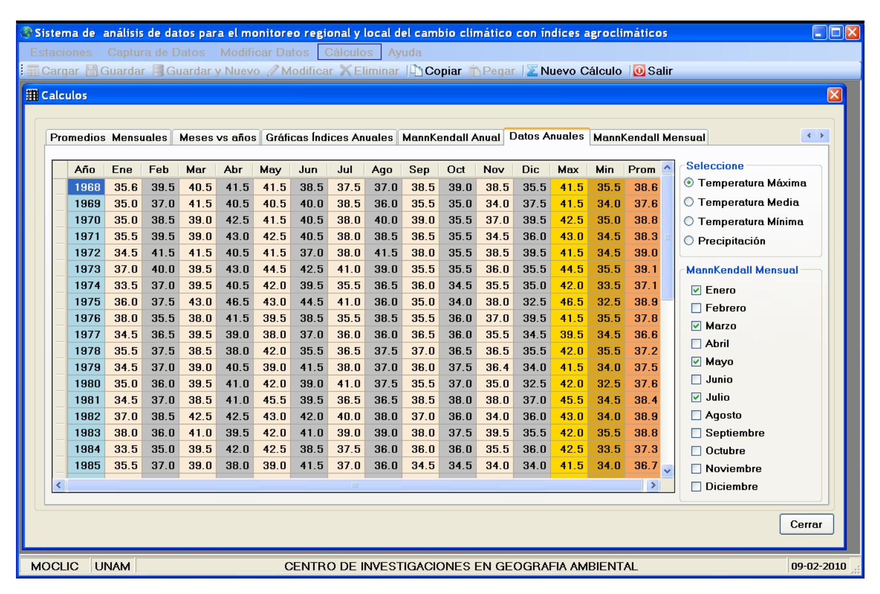
Con la pestaña se llega a los datos de las temperaturas de cada año y de sus meses correspondientes, así como al valor máximo, mínimo y promedio de los meses en cada año por filas; además, se muestran datos máximos, mínimos y promedio de cada mes por el conjunto de años en columnas. Los datos se muestran de acuerdo al cuadro de selección para temperatura máxima, media y mínima y para la precipitación.

Con el recuadro Mann-Kendall mensual se pueden seleccionar los meses a los que se quiere calcular la prueba estadística de Mann-Kendall; la selección del mes se hace con clic en el recuadro de cada mes. Los datos calculados se mostrarán en la pestaña Mann-Kendall mensual (Fig. 28).

5.5 Técnicas de análisis de series de tiempo para identificar tendencias de cambio climático

Coeficiente de correlación

El coeficiente de correlación se expresa mediante un número entre –1 y 1. Mide el grado de relación lineal entre dos variables, el número será positivo cuando la pendiente de la relación también lo sea, es decir, cuando



Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Max	Min	Prom
1968	35.6	39.5	40.5	41.5	41.5	38.5	37.5	37.0	38.5	39.0	38.5	35.5	41.5	35.5	38.6
1969	35.0	37.0	41.5	40.5	40.5	40.0	38.5	36.0	35.5	35.0	34.0	37.5	41.5	34.0	37.6
1970	35.0	38.5	39.0	42.5	41.5	40.5	38.0	40.0	39.0	35.5	37.0	39.5	42.5	35.0	38.8
1971	35.5	39.5	39.0	43.0	42.5	40.5	38.0	38.5	36.5	35.5	34.5	36.0	43.0	34.5	38.3
1972	34.5	41.5	41.5	40.5	41.5	37.0	38.0	41.5	38.0	35.5	38.5	39.5	41.5	34.5	39.0
1973	37.0	40.0	39.5	43.0	44.5	42.5	41.0	39.0	35.5	35.5	36.0	35.5	44.5	35.5	39.1
1974	33.5	37.0	39.5	40.5	42.0	39.5	35.5	36.5	36.0	34.5	35.5	35.0	42.0	33.5	37.1
1975	36.0	37.5	43.0	46.5	43.0	44.5	41.0	36.0	35.0	34.0	38.0	32.5	46.5	32.5	38.9
1976	38.0	35.5	38.0	41.5	39.5	38.5	35.5	38.5	35.5	36.0	37.0	39.5	41.5	35.5	37.8
1977	34.5	36.5	39.5	39.0	38.0	37.0	36.0	36.0	36.5	36.0	35.5	34.5	39.5	34.5	36.6
1978	35.5	37.5	38.5	38.0	42.0	35.5	36.5	37.5	37.0	36.5	36.5	35.5	42.0	35.5	37.2
1979	34.5	37.0	39.0	40.5	39.0	41.5	38.0	37.0	36.0	37.5	36.4	34.0	41.5	34.0	37.5
1980	35.0	36.0	39.5	41.0	42.0	39.0	41.0	37.5	35.5	37.0	35.0	32.5	42.0	32.5	37.6
1981	34.5	37.0	38.5	41.0	45.5	39.5	36.5	36.5	38.5	38.0	38.0	37.0	45.5	34.5	38.4
1982	37.0	38.5	42.5	42.5	43.0	42.0	40.0	38.0	37.0	36.0	34.0	36.0	43.0	34.0	38.9
1983	38.0	36.0	41.0	39.5	42.0	41.0	39.0	39.0	38.0	37.5	39.5	35.5	42.0	35.5	38.8
1984	33.5	35.0	39.5	42.0	42.5	38.5	37.5	36.0	36.0	36.0	35.5	36.0	42.5	33.5	37.3
1985	35.5	37.0	39.0	38.0	39.0	41.5	37.0	36.0	34.5	34.5	34.0	34.0	41.5	34.0	36.7

Fig. 28. Valores máximos, mínimos y promedios anuales.

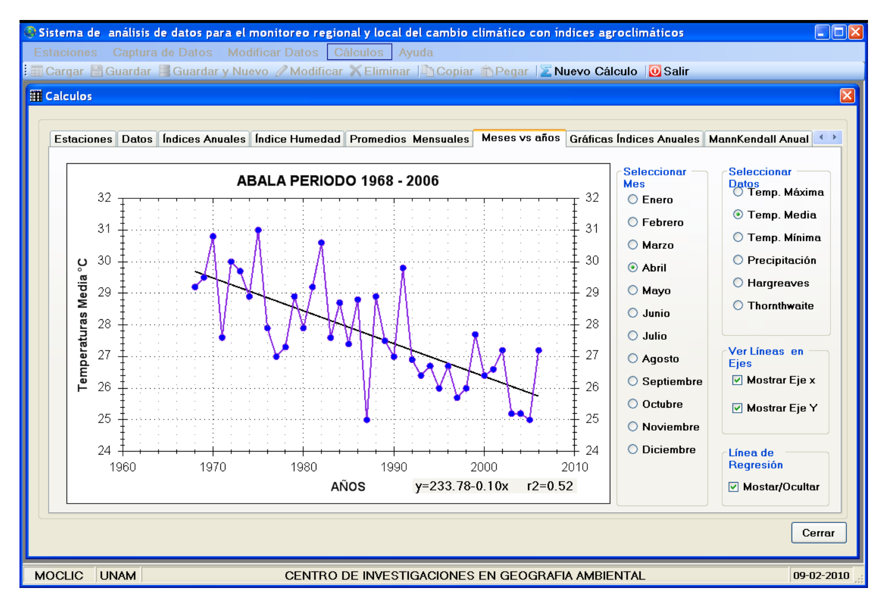


Fig. 29. Resultado del análisis de tendencia con coeficiente de correlación.

la relación es directamente proporcional. El valor será negativo cuando la relación es indirectamente proporcional. De lo anterior referimos que: +1 ó –1= correlación perfecta; 90%= correlación muy alta; 80%= correlación alta; 70%= correlación buena; 50%= correlación parcial; 0%= no existe correlación.

El análisis de correlación puede utilizarse como un primer acercamiento a la identificación de cambios en los elementos del clima y en los índices agroclimáticos, puede usarse aun cuando las series de tiempo contengan datos discontinuos.

Coeficiente de correlación de Mann-Kendall

La prueba de Mann-Kendall (MK) es estadística no paramétrica. Se usa para identificar las tendencias de cambio no lineales de una serie de datos en iguales intervalos de tiempo, en este caso los cambios, de los elementos del clima y los índices agroclimáticos que presentan distribución de tipo no normal.

El procedimiento de la prueba de MK se inicia mediante la simple comparación del dato más reciente de la serie de tiempo con los resultados anteriores. Una puntuación de 1 se da si la concentración más reciente es más grande, o una puntuación de –1 si es más pequeña. La puntuación total de la serie de datos es la estadística de MK, que se compara con un valor crítico para comprobar si la tendencia va en aumento, disminuye o si no existe cambio (Carlón y Mendoza 2007, Castañeda y González 2008).

El proceso de análisis se realiza de la siguiente manera:

1. Los pares de datos n ($x1, y1$), ($x2, y2$), ... (xn, yn) son indexados de acuerdo a la magnitud del valor de x, tal que $x1 \leq x2 \leq ... \leq xn$ y yi es el valor de la variable dependiente que corresponde a xi.
2. Al examinar los todos los n (n–1 pares) / 2 ordenada de valores yi. Sea P de número de casos en $yi > yj$ ($i > j$), y Sea M el número de casos en los $yi < yj (i > j)$.
3. Por definir las estadísticas de prueba S = P–M.
4. Para n> 10, se realiza la prueba utilizando una aproximación normal. La estadística de las pruebas estandarizadas Z se calcula:

$$Z = \begin{cases} \dfrac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \dfrac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & S < 0 \end{cases}$$

y $Var(S)$ = n(n – 1)(2n + 5)/18

1. La hipótesis nula se rechaza al punto de significación α si |Z|> Z(1–α)/2, donde Z(1–α)/2 es el valor de la distribución normal estándar con una probabilidad de superación de α/2 . Por ejemplo, si α = 0,05, entonces la hipótesis nula sería rechazado por |Z|> 1.96. En los casos en que algunas de las *x* o valores *y* se atan, esta fórmula para *Var(S)* es modificada. Si el tamaño de la muestra es menor que 10, entonces es necesario el uso de tablas para el estadístico S.
2. El coeficiente de correlación τ de Mann-Kendall se define como

$$\tau = \frac{S}{\frac{n(n-1)}{2}}$$

Al igual que con otros tipos de coeficientes de correlación, τ sólo puede tomar valores entre –1 y 1, su signo indica el signo de la pendiente de la relación, y el valor absoluto indica la fuerza de la relación.

Debido a que la prueba se utiliza sólo las filas de los datos, puede aplicarse incluso en los casos en que algunos de los datos no se tengan. Esta es una característica importante de la prueba para su aplicación en la climatología. Cuando faltan valores en una serie de datos se introduce una corrección en la formula de la varianza (S), en la cual los valores faltantes se anudan, la formula es:

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^{n} t_i i(i-1)(2i+)}{18}$$

Donde *ti*, es el número de vínculos de extensión *i*.

La prueba no puede ser aplicada cuando existen múltiples umbrales de rechazo de la hipótesis nula en el conjunto de datos ya que los valores no pueden ser clasificados de forma ambigua (Hirsch *et al*. 1993).

En este caso las particularidades de la prueba de MK son:

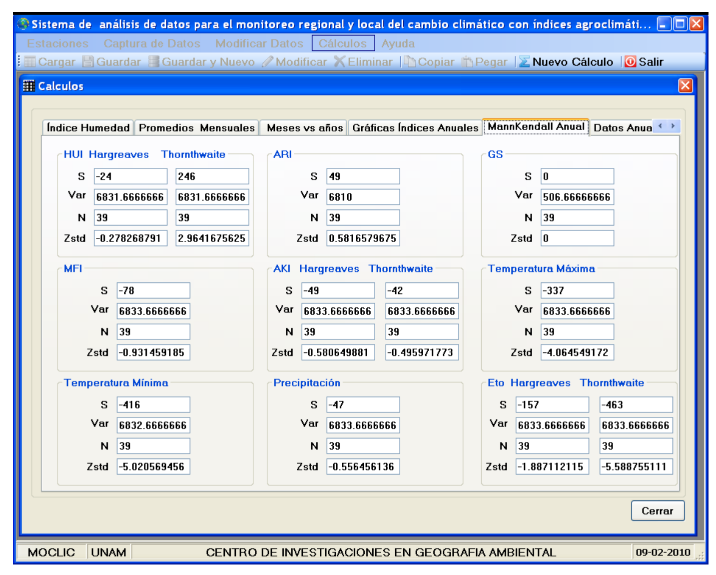


Fig. 30. Resultados del análisis de tendencia con la prueba Mann-Kendall anual.

a) La prueba no tiene en cuenta la magnitud de los datos;
b) Es menos sensible a los datos extremos;
c) No tiene en cuenta la variación temporal en los datos de tal manera que no podemos obtener la magnitud de la tendencia; y
d) Los datos deben estar libres de estacionalidad.

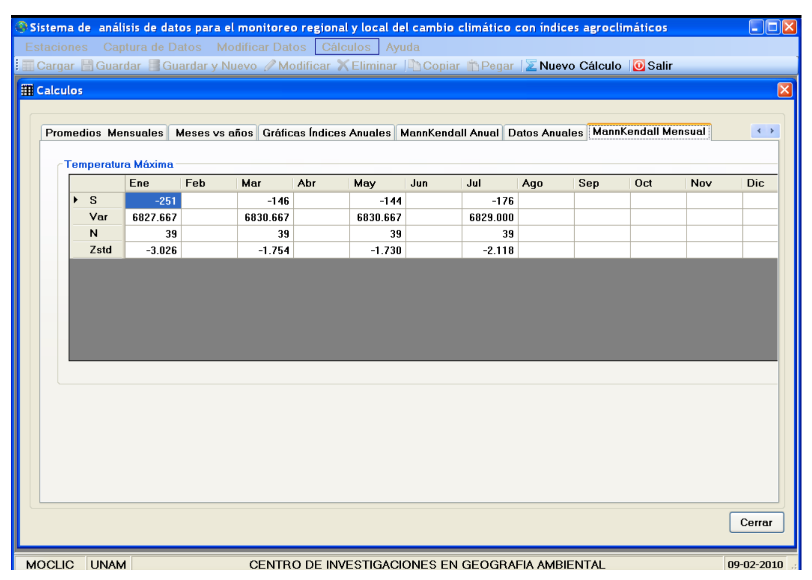
Cuando los datos son estacionales se recomienda usar las temperaturas extremas en lugar de las medias. Un resultado de no tendencia no equivale a una serie de datos estable, equivale a una tendencia no detectada con esta prueba. Un resultado de tendencia de disminución o aumento de la prueba MK es una conclusión más sólida que la no tendencia. A menos datos disponibles, es menos confiable el resultado de la prueba de MK.

Con MOCLIC se seleccionan los elementos del clima y los índices agroclimáticos a los que se les desea aplicar la prueba de tendencia de MK. El resultado del análisis se muestra en la pantalla con los parámetros S, Var, N y Zstd, que corresponden a: estadístico de la tendencia, varianza, número de casos de la serie de datos y valor de Z estandarizado.

Si $Z > 1.96$ entonces hay significancia estadística para las serie de datos; es decir, hay tendencia. Un valor positivo de Z indica una tendencia ascendente; un valor negativo indica una tendencia descendente en la serie de datos.

Pestaña Mann-Kendall mensual

Desde esta pestaña se pueden observar los resultados de la prueba de Mann-Kesndall por mes de la temperatura seleccionada en la pestaña datos anuales (Fig. 31).



	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
S	-251		-146		-144		-176					
Var	6827.667		6830.667		6830.667		6829.000					
N	39		39		39		39					
Zstd	-3.026		-1.754		-1.730		-2.118					

Fig. 31. Resultados del análisis de tendencia con la prueba Mann-Kendall mensual.

5.6 Menú de ayuda

Submenú Acerca de

Muestra información del sistema, como: nombre, versión, copyright, compañía, descripción (Fig. 32).

Agradecimientos

Los autores agradecen a el Fondos Mixtos entre el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y el Gobierno del Estado de Yucatán (El FOMIX), convocatoria YUC-2006-C05-66159, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, convocatoria APO-SNI-090315, al Dr. Manuel Mendoza por el apoyo con el módulo para el análisis de tendencia por Mann-Kendall, al M. en E. Claudio Amescua, a la Dra. María Amparo Martínez Arroyo y al Dr. Gerardo Bocco por las facilidades para la publicación, al Lic. Rafael López por las correcciones de estilo de este manual.



Fig. 32. Acerca de…

6. Referencias

Arkley R. (1963). Relationships between plant growth and transpiration. *Hilgardia* 34:559-584.

Arnoldus H.M.J. (1980). An approximation of the rainfall factor in the universal soil loss equation. En: *Assessment of erosion* (M. de Boodt y D. Grabriels, Eds.). John Wiley & Sons, Nueva York.

Bautista F., Bautista D. y Delgado-Carranza C. (2009). Calibration of the equations of Hargreaves and Tornthwaite to estimate the potential evapotranspiration in semi-arid and subhumid tropical climates for regional applications. *Atmósfera* 22, 331-348.

Borges A. C. y Mendiondo E. M. (2007). Comparação entre equações empíricas para estimativa da evapotranspiração de referência na Bacia do Rio Jacupiranga. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 11, 293-300.

Camargo A. P. y CamargoM. B. P. (2000). Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. *Bragantia Campinas* 59, 125-137.

Carlón T. y Mendoza M. (2007). Análisis hidrometeorológico de las estaciones de la cuenca del Lago de Cuitzeo. *Investigaciones Geográficas* 63, 56-76.

Castañeda M. y González M. (2008). Statistical analysis of the precipitation trends in the Patagonia region in southern South America. *Atmósfera* 21, 303-317.

CEC (1992). CORINE soil erosion risks and important land resources. Commission of the European Communities, DGXII. EUR 13233 EN. Bruselas.

Delgado Carranza C. (2010). Zonificación agroecológica del estado de Yucatán con base en índices agroclimáticos y calidad agrícola del agua subterránea. Tesis de doctorado. Centro de Investigación Científica de Yucatán, México.

FAO (1996). Agro-ecological zoning: Guidelines. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.78 p.

Hargreaves G.H. y Samani Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Appl. Eng. Agric.* 1, 96-99.

Hirsch R., Heisel D., Cohn T. y Gilroy E. (1993). Statistical analysis of hidrology data. En: *Handbook of hidrology* (D. Maidment, Ed.). McGraw-Hill Inc. EUA.

Lobo D., Gabriels D., Ovalles F., Santibañez F., Moyano M.C., Aguilera R., Pizarro R., Sanguesa C. y Urra N. (2004). Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y el Caribe. CAZALAC- PHI/UNESCO. Caracas, Venezuela.

Llorente, J.M. 1961. *Meteorología*. Labor, Barcelona, España.

Oliver J.E. (1980). Monthly precipitation distribution: a comparative index. *Professional Geographer* 32, 300-309.

Thornthwaite C.W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* 38, 55-94.

Willmott C.J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. *Bull. Am. Meteorol. Soc. AMS.* 63, 1309-1313.

Apéndice I

Calibración de modelos de evapotranspiración

Debido a que el software permite la inclusión de las adaptaciones locales a los modelos de Hargreaves y Thornthwaite, en este apéndice incorporamos la metodología.

Ajuste de los modelos

Las estimaciones de prueba de *ETo* con HM y TM se ajustan al resultado de la ecuación de referencia, PM. Los ajustes se realizan cambiando el valor de la constante correspondiente, *Ci* en el caso de HM, y *C* en el caso de TM, con el valor original de 0.0023 y 16, respectivamente (Borges y Mendiondo 2007, Bautista *et al.* 2009).

La determinación de los nuevos valores de las constantes de HM y TM para cada mes por al menos tres años de datos, se calculan de la siguiente manera:

$$Ciadj = (0.0023)/(HM/PM) \qquad (5)$$

$$Cadj = (16)/(TM/PM) \qquad (6)$$

Donde: *Ciadj* = nuevo valor de la constante de Hargreaves;

Cadj = nuevo valor de la constante de Thornthwaite;

HM = estimación mensual de *ETo* con la ecuación de Hargreaves;

TM = estimación mensual de *ETo* com la ecuación de Thornthwaite;

PM = estimación mensual de *ETo* con la ecuación de Penman-Monteith.

Los valores promedio de las constantes de las ecuaciones a prueba son propuestas por la variación anual de los nuevos valores mensuales.

Comparación de modelos

Las estimaciones de HM y TM con PM se compararon mediante un análisis de correlación, y además se calculó un índice de concordancia (D) (Camargo y Camargo 2000):

$$D = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)}{\sum (|P_i - O| + | O_i - O|)^2} \right] \quad (7)$$

Donde P_i es el valor estimado para cada modelo de prueba (TM y HM); O_i es el valor estimado de PM; y O es el promedio de los valores estimados de PM.

El índice de confianza (C) se calcula como el producto del coeficiente de correlación lineal (R) y el índice de concordancia (D)

$$C = R \times D \quad (8)$$

C = 0 indica nula confianza y C = 1 indica confianza total

En la comparación de la estimación de *ETo* con PM y los métodos HM y TM, se realiza un análisis del error y regresión lineal. La comparación se realiza antes y después del ajuste. Para cada localidad se realizó el cálculo de los siguientes parámetros (Willmott 1982): sesgo medio del error (SME), raíz cuadrada del error medio (RCEM), error relativo (ER) y el cociente de las estimaciones promedio de HM y TM con PM (r).

$$SME = \frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - x_i)}{n} \quad (9)$$

$$RCEM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (10)$$

$$ER = \frac{SME}{x} \times 100 \quad (11)$$

$$\underline{r} = \frac{ymed}{} \quad (12)$$

Donde n es el número de días disponibles; *yi* es la *ETo* estimada con el modelo a prueba; *xi* es la *ETo* estimada con PM; *xmed* y *ymed* son los promedios para un sitio dado de la *ETo* evaluada con PM y la *ETo* estimada con el modelo a prueba, respectivamente.

Apéndice II

INFORMACIÓN TÉCNICA

II.1 Requerimientos informáticos

- CPU: Procesador a 1.0 GHz o superior
- RAM: 1 GB para una ejecución óptima.
- Pantalla: VGA para presentaciones gráficas. Resolución recomendada 1200x800
- Unidades ópticas: CD-ROM para la instalación
- Disco duro: Con espacio suficiente para programas y datos. 100 Mb libres para instalación de sistema y datos.
- Sistema operativo: Microsoft Windows XP, Windows Vista, Windows 7 o distribuciones superiores a XP.
- Paquetería: Microsoft Framework 2.0, Microsoft SQL Server Express, Microsoft Windows Installer 3. (Los paquetes vienen incluidos en el CD y se instalan automáticamente).

II.2 Archivos de sistema

Directorio \MOCLIC\

MOCLIC.EXE
BDCLIMAS.MDF
MSHFLXGD.OCX
MSTGRID.OCX
AXINTEROP.MSHIERARCHICALFLEXGRIDLIB.DLL
INTEROP.MSHIERARCHICALFLEXGRIDLIB.DLL
AXINTEROP.MSTGRID.DLL
INTEROP.MSTGRID.DLL
ZEDGRAPH.DLL

III.3 Posibles fallos

Los fallos frecuentes en la instalación podrían estar asociados al espacio insuficiente de disco duro o a la versión de sistema operativo, así como las versiones de los paquetes instalados.

En la aplicación podrían suscitarse dificultades al momento de calcular variables, debido a datos erróneos capturados.